基于 MaxEnt 模型预测中国兰属植物的分布格局及主导气候因子

郑芳[1,2]，黄智聪[1,2]，陈利君[1,2]，王蒙[1,2]，严岳鸿[1,2]，陈建兵[1,2*]

（1. 兰科植物保护与利用国家林业和草原局重点实验室，广东 深圳 518114；

2. 深圳市兰科植物保护研究中心，广东 深圳 518114）

摘　要：兰属（*Cymbidium*）所有种（除兔耳兰 *C. lancifolium* 外）均被列为国家重点保护野生植物，研究其在未来气候条件下的潜在分布格局，将对该类群的有效合理保护提供参考和依据。该文基于兰属植物已知的分布点和 19 个气候因子，利用 MaxEnt 模型和地理信息系统（ArcGIS）模拟兰属以及其中 20 种兰属植物在九种不同气候情景（当代以及未来 2030s、2050s、2070s 和 2090s 四个时间段各两种温室气体排放情景）下的潜在分布格局，并找出影响兰属植物分布的主导气候因子。结果表明：（1）最干旱季降水量（Bio17）、年降水量（Bio12）和温度季节性变化（Bio04）是影响兰属植物地理分布格局的主导气候因子。（2）从物种水平上分析，不同兰属植物在未来情景下的适生区表现出不同的变化趋势，且影响其分布的主导气候因子也有所不同。其中，冬凤兰（*C. dayanum*）等 8 个物种的适生区面积总体呈扩张趋势，而西藏虎头兰（*C. tracyanum*）等 12 个物种的适生区面积整体则呈缩减趋势。该研究将为兰属植物就地保护与迁地保护提供重要参考，对兰属等濒危野生植物的保护具有积极意义。

关键词：最大熵，物种分布模型，主导气候因子，保护策略，气候变化

中图分类号：　　**文献标识码：**A　　**文章编号：**

Predicting the future distribution patterns and dominant climatic factors of *Cymbidium* in China using MaxEnt model

ZHENG Fang[1,2], HUANG Zhicong[1,2], CHEN Lijun[1,2], WANG Meng[1,2], YAN Yuehong[1,2], CHEN Jianbing[1,2*]

(1. *Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration for Orchid Conservation and Utilization*, 518114, Guangdong China; 2. *the Orchid Conservation & Research Center of Shenzhen*, 518114, Guangdong China)

Abstract: Except for *Cymbidium lancifolium*, all the *Cymbidium* species have been listed as national key protected wild plants, and the research of its future distribution patterns under the

基金项目：中央林业改革发展资金（粤财资环[2019]5 号）。

第一作者：郑芳（1980-），硕士，实验师，研究方向为兰科植物保护（E−mail）zhengfang1102@126.com。

***通信作者：**陈建兵，硕士，研究方向为兰科植物保护（E−mail）cjb@cnocc.cn。

future climate would provide a reference and basis to protect this genus effectively. This paper gathered the distribution information of *Cymbidium* and 19 climatic factors, and used the Maximum Entropy Model (MaxEnt) and Geographic Information System (ArcGIS) to predict the future distribution patterns of the *Cymbidium* in China and its 20 species. The future distribution patterns were predicted under nine different climate scenarios, including the current climate and eight future climate scenarios. We also analyzed the dominant climate factors affecting the distribution. The results were as follows: (1) The precipitation of the driest quarter (Bio17), annual precipitation (Bio12) and temperature seasonality (Bio04) are the dominant climate factors affecting the future distribution of *Cymbidium*. (2) The analysis of species-level shows that the suitable areas of different *Cymbidium* species have different change trends in the future scenario, and the dominant climate factors affecting them are also different. The suitable habitat area of eight *Cymbidium* species such as *C. dayanum* trends gradually increases, while the suitable habitat area of 12 *Cymbidium* species such as *C. tracyanum* decreases. In conclusion, this study can provide an important reference for in-situ and ex-situ conservation of *Cymbidium*, and has positive significance to the protection of *Cymbidium* and other endangered wild plants.

Keywords: MaxEnt model, species distribution models, dominant climate factor, conservation strategy, climate change

气候是影响物种自然地理分布最重要的因素之一，气候变化会对生态系统结构和功能、群落组成、物种的分布格局和生物多样性等均产生影响（Robert & Raza, 2010；Bellard et al., 2012；Veloz et al. 2012；沈永平和王国亚，2013）。在过去的 100 年里，人类活动导致全球平均地表温度上升了大约 0.85ºC，预计至 21 世纪末，与基准期相比，全球平均地表温度将升高 0.3−4.8℃，降水格局也会发生明显变化（IPCC, 2014；秦大河等，2007）。全球气候变化可能会导致大多数物种的分布区消长、变迁，栖息地丧失和破碎化也会引起自然分布范围狭小的濒危物种灭绝（Root et al., 2003；Thomas et al., 2004；陈冬梅等，2011；周海涛等，2016）。因此，全球气候变化会影响植物的地理分布格局（Bertin, 2008）。

物种分布模型（species distribution model, SDM）（Elith & Leathwick, 2009）对不同气候情景下物种潜在分布区变化有很好的预测能力，已被广泛应用在植物（Sunil & Thomas, 2009；Adhikari et al., 2012；Hu et al., 2015；张佳琦等，2019）和动物（杨春平等，2020）中。其中，由美国学者 Phillips 等（2006）开发的最大熵法（MaxEnt）生态位模型预测结果准确、性能良好（许仲林等，2015），应用最为广泛，已在狸尾豆属植物（*Uraria*）（朱梦婕等，2020）、春兰（*Cymbidium goeringii*）和蕙兰（*C. faberi*）（梁红艳等，2018）、梓叶槭（*Acer catalpifolium*）（黄睿智等，2021）、长苞铁杉(*Tsuga longibracteata*) （谭雪等，2018）等类群中得到应用。

兰属（*Cymbidium*）是兰科（Orchidaceae）中最具观赏价值的类群之一，长期受学者和民众的喜爱和关注，具有重要的科研、经济、文化和社会价值。该属在全世界约有 80 余种（Hunt, 1970；Long et al., 2003；Yang et al., 2013；刘仲健等，2006），主要分布于亚洲热带

与亚热带地区，以及澳洲北部，通常被发现于气候凉爽的高海拔地区（Chen, 1999），常生长在林下腐殖质土中，偶有生长在石上或附生于树干。中国是该属的多样性中心，约有60种，其中20多种为中国特有（刘仲健和张景宁，1998；刘仲健和陈心启，2002；刘仲健和陈心启，2004；刘仲健等，2005）。然而，近年来由于气候变化及人类活动干扰日益严重，适合兰科植物的生境急剧恶化，野生资源日益减少，其生存现状受到严重威胁，多数兰科植物在《中国物种红色名录》中濒危等级为受威胁等级。

本研究以兰科兰属植物为研究对象，选取19个气候因子作为环境变量，依托种质资源调查和查阅文献获取的位置信息，以及从中国数字标本馆(https://www.cvh.ac.cn/) 收集的分布信息，采用MaxEnt模型和ArcGIS地理信息系统空间分析技术，模拟预测该属植物在不同情景下的潜在分布区，拟探讨以下问题：（1）预测分析兰属植物在未来不同气候情景下的潜在分布格局变化；（2）找出影响兰属植物分布格局的主导气候因子；（3）为兰属植物的野外调查、系统分类学、生物地理学和保护生物学研究提供理论依据和实践参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集与处理

1.1.1 种质资源调查

依据《中国植物志》（Chen，1999）、文献以及标本记录记载的分布和性状描述，查阅兰属植物的历史分布点。对其在中国境内的实际分布区进行野外实地调查，记录每个种群的分布地点、经纬度、海拔、受威胁因素、生境类型等信息。

1.1.2 物种分布信息

物种分布信息来源于三个方面：一是根据课题组种质资源调查，分布点经纬度信息由GPS实地定位获得；二是通过查阅国内外相关已发表文献，找出其已报道的分布地点，用百度拾取坐标查找相应的经纬度坐标。三是通过中国数字植物标本馆（http://www.cvh. ac. cn/）和全球生物多样性信息网络（https://www.gbif.org/）获取标本采集地经纬度信息。通过以上三个途径，获得中国兰属35个物种共3170条分布记录。剔除栽培、购买等采集点，以及重叠和记录模糊的采集点，最终得到24个物种共915条有效分布记录。

1.1.3 气候因子数据

本研究选取的现代（1970−2000年）和未来2030s（2021−2041年）、2050s（2041−2060年），2070s（2061−2080年）和2090s（2081−2100年）的19个气候因子数据，均来源于世界气候数据库WorldClim（http://worldclim.org），空间分辨率为2.5′。现代气候数据是根据1970–2000年全球不同气象站点记录的气候数据经插值法生成。未来气候数据选择CMIP6计划中精度为2.5 minutes的BCC−CSM2−MR模式下的SSP1−2.6和SSP5−8.5两组数据。数据经ArcGIS 10.6软件剪裁为中国范围并转换为ASCII格式。

1.1.4 叶绿体基因组数据

从 NCBI（https://www.ncbi.nlm.nih.gov/）数据库共获取了 17 个已公布兰属植物的叶绿体基因组，同时，下载贵州地宝兰（*Geodorum eulophioides*）的叶绿体基因组作为外类群。叶绿体基因组信息和 GenBank 登录号详见表 1。

另外，取样测序得到莎叶兰（*C. cyperifolium*）、莎草兰（*C. elegans*），黄蝉兰（*C. iridioides*）的叶绿体基因组。

1.2 研究方法

1.2.1 建立模型

采用 MaxEnt version 3.4.1（http：//biodiversityinformatics.amnh.org/open_source /maxent）模拟兰属植物在不同气候情境下的潜在分布格局，设置训练集为 75%，测试集为 25%进行模拟分析。将物种分布数据与气候因子数据一起导入 MaxEnt 中，选择刀切法（jackknife），绘制响应曲线并制作预测图。

1.2.2 模型精度检验

采用受试者工作特征曲线(receiver operator characteristic curves, ROC curves)对模型的精度进行评价。ROC 曲线与横坐标所围成区域面积（AUC）的大小具有不受临界值影响的特性，可用于评价预测模型的准确性（郭杰等，2017；邓飞等，2014；周扬等，2019）。AUC 的取值范围为 0 −1，其取值越大表示与随机分布相聚越远，预测的效果越好。当 AUC 值介于 0.5−0.6 时，表示模型预测失败；当 AUC 值介于 0.6 −0.7 时，表示预测结果较差；当 AUC 值介于 0.7−0.8 时，表明预测效果一般；当 AUC 值介于 0.8 − 0.9 时，表示预测效果好；当 AUC 值介于 0.9 −1 时，表示预测效果非常好。

1.2.3 适生区等级的划分

MaxEnt 结果输出文件为 ASCII 格式，将其加载到 ArcGIS 10. 6 中，使用“ArcToolbox”中的“格式转换工具”转换为栅格数据，利用“重分类工具（Reclassify）”将兰属植物的生境适宜性按照“自然间断点分级法（Natural break）”划分成 4 类，即非适生区、低适生区、中适生区和高适生区，并计算各适生区的面积。

1.2.4 系统发育树构建

以贵州地宝兰作为外群，将 20 种兰属植物的叶绿体全基因组序列，利用 HomBlocks（Bi et al., 2017）软件进行基因组序列的比对；比对结果利用 IQ−TREE version 2.1.2（Trifinopoulos et al., 2016），构建兰属植物的 ML (maximum likelihood)系统进化树，Bootstrap 值设置为 1000，建树最优模块由 IQ−TREE 内置的 ModelFinder（Kalyaanamoorthy et al., 2017）进行选择。

2 结果和分析

2.1 最大熵模型预测潜在分布格局

2.1.1 模型准确性检验

运用 MaxEnt 模型基于 19 个气候因子构建的兰属植物全属及其中 20 个物种（另外 4 种

兰属植物由于位置信息太少，结果可信度不高，仅用于预测全属的分布格局）在当代、未来四个时段两种不同气候情景下的地理分布模型的 AUC 值分别在 0.849–0.992 之间（表 2），平均值 0.953。

基于 ROC 曲线分析法对 MaxEnt 预测的当前气候条件整个兰属植物潜在地理分布结果进行检验，分析得出：训练集（training data）和测试集（Test data）的 AUC 值分别可达 0.916 和 0.911，远大于随机预测（random prediction）的 AUC 值 0.5（图 1），表明该模型预测结果具有较高的准确性，可以用于兰属植物在中国的潜在分布区模拟研究。

2.1.2 影响兰属植物分布的主导气候因子

物种分布模型涉及的气候因子对模型的贡献百分率表(表 3)显示：当前气候情景下对兰属植物全属地理分布影响较大的气候因子为：最干旱季降水量（Bio17）、年降水量（Bio12）和温度季节性变化（Bio 4），贡献率分别为 46.3%、28.4%和 7.2%，贡献率总和达到 81.9%。为了避免气候因子间的自相关，利用 ArcGIS10.6 软件提取 915 个兰属植物分布点的气候因子信息，利用 SPSS 23.0 软件的 Pearson 相关系数法分析气候因子的相关性，保留相关系数 $|r| < 0.8$ 的气候因子，对于 $|r| > 0.8$ 的气候因子，保留贡献率较大的一个，最后筛选出 7 个气候因子：Bio2、4、6、10、12、17、18。用筛选过的气候因子进行分析预测，结果显示当前气候情景下对兰属植物全属地理分布影响较大的气候因子仍为：最干旱季降水量（Bio17）、年降水量（Bio12）和温度季节性变化（Bio 4），贡献率分别为 50.0%、27.3%和 15.9%，贡献率总和达到 93.2%。刀切法检验结果表明(图 2) ，变量单独使用时，年降水量（Bio12）在受试变量中测试增益最突出；省略变量时，减少增益最多的气候因子是温度季节性变化（Bio 4）。

兰属植物分布对最干旱季降水量（Bio17）、年降水量（Bio12）和温度季节性变化（Bio 4）的响应曲线见图 3。兰属植物在最干旱季降水量 50~200 mm 的区域内分布概率较大，在 0~57 mm 范围内，分布概率与降水量呈正相关，当降水量超过 57 mm 后，分布概率与降水量呈负相关，当降水量超过 630mm 后，降水量变化不再影响兰属植物的分布概率。年降水量为 2 000 mm 时，该属存在概率最大，伴随年降水量的增加，存在概率与降水量呈负相关，当年降水量达到 4 000 mm 以后，存在概率保持不变。温度季节性变化在约 3 ℃时，兰属植物存在概率最高，随着温度季节性变化的升高，兰属植物存在概率急剧下降。

主导冬凤兰（*C. dayanum*）和独占春（*C. eburneum*）地理分布的气候因子为：温度季节性变化（Bio4）和最冷季的平均温度（Bio11）；主导豆瓣兰（*C. serratum*）的地理分布的主要气候因子为：年温度变化范围（Bio7）和温度季节性变化（Bio4）；主导墨兰（*C. sinense*）和纹瓣兰（*C. aloifolium*）地理分布的气候因子为：最湿润季降水量(Bio16)和最干旱季降水量（Bio17）；主导碧玉兰（*C. lowianum*）和黄蝉兰（*C. iridioides*）地理分布的气候因子为：等温性（Bio3）和温度季节性变化（Bio4）；主导长叶兰（*C. erythraeum*）和莎草兰（*C. elegans*）地理分布的气候因子为：等温性（Bio3）、温度季节性变化（Bio4）和最冷月份最低温度（Bio6）；

主导寒兰（*C. kanran*）、建兰（*C. ensifolium*）和多花兰（*C. floribludum*）地理分布的气候因子为：年降水量（Bio12）和最干旱季降水量（Bio17）；主导大根兰地理分布的气候因子为：最冷月份最低温度（Bio6）和年温度变化范围（Bio7）；主导兔耳兰（*C. lancifolium*）地理分布的气候因子为：最干旱季降水量（Bio17）和最暖季降水量（Bio18）；主导西藏虎头兰（*C. tracyanum*）地理分布的气候因子为：等温性（Bio3）、温度季节性变化（Bio4）、最干旱季降水量（Bio17）和最暖季降水量（Bio18）；主导莎叶兰（*C. cyperifolium*）地理分布的气候因子为：年温度变化范围（Bio7）和最干旱季降水量（Bio17）；主导虎头兰（*C. hookerianum*）地理分布的气候因子为：温度季节性变化（Bio4）和最暖季降水量（Bio18）；主导硬叶兰（*C. mannii*）地理分布的气候因子为：最冷季的平均温度（Bio11）；主导春兰地理分布的气候因子为：年降水量（Bio12）和最干燥月份降水量（Bio14）；主导蕙兰地理分布的气候因子为：最冷月份最低温度（Bio6）、年降水量（Bio12）和最干旱季降水量（Bio17）。

2.1.3 现代及未来气候情景下兰属植物的潜在地理分布格局

选取现代气候情景和未来 2030s、2050s、2070s 和 2090s 两条典型浓度路径（SSP1−2.6 和 SSP5−8.5），利用 MaxEnt 模型对兰属植物的潜在地理分布格局进行模拟，得到不同气候情景下的适生区面积（附录 1，图 4、图 6−9）。

现代气候条件下，兰属植物适生总面积为 248.18×10^4 km^2，其中高适生区面积为 100.37×10^4 km^2，中适生区和低适生区面积分别为 80.43×10^4 km^2 和 67.39×10^4 km^2（附录 1，图 4）。未来不同温室气体排放情景下，兰属植物适生区面积变化曲线（图 5）显示总适生区程缩小趋势，其中高适生区缩小幅度最大为 33.08%、中适生区面积缩小幅度最大为 15.57%，低适生区面积呈增加趋势。

从物种水平来看，冬凤兰、大根兰、墨兰、豆瓣兰，碧玉兰、兔耳兰、纹瓣兰和独占春在未来 8 种情景下适生区面积跟现代气候下相比，总体呈扩张趋势，其中独占春和兔耳兰的低适生区面积在未来呈缩减趋势，但是高适生区和中适生区面积都大幅增加。冬凤兰和豆瓣兰在 SSP1−2.6 情景下，四个未来时间段的总适生区，高、中、低适生区面积均大幅增加，在 SSP5−8.5 情景下，高适生区面积也大幅增加（图 4）。碧玉兰在 SSP5−8.5 情景下，未来四个时间段的总适生区、高、中、低适生区面积均大幅增加，在 SSP1−2.6 情景下，除高适生区以外，总适生区，中、低适生区面积也都呈扩张趋势。在 2090s 阶段，两种情景下，纹瓣兰的总适生区，高、中、低适生区面积均增加。墨兰和大根兰的总适生区，高、低适生区面积在 SSP1−2.6 和 SSP5−8.5 情景下均呈大幅增加，中适生区面积整体也呈增加趋势，其中墨兰在 SSP5−8.5 情景下，2090s 高适生区面积增幅达 68.42%。

西藏虎头兰、虎头兰、长叶兰、莎草兰、硬叶兰、莎叶兰、多花兰、寒兰、蕙兰、春兰、黄蝉兰和建兰在未来情景下适生区面积整体呈缩减趋势。其中，长叶兰和莎草兰的总适生区、高、中、低适生区面积在未来 4 个阶段，两种情景下均呈缩减趋势，幅度为 3.05%~58.88%。莎草兰、硬叶兰在 SSP5−8.5（2061−2100 年）情景下，高适生区面积增加，在其他情景下总

适生区、中、低适生区面积均减少。多花兰的总适生区和高适生区面积在 8 种未来情景下呈缩减趋势，中、低适生区面积变化不明显。莎叶兰在 SSP1−2.6（2041−2080 年）和 SSP5−8.5（2081−2100 年）情景下，总适生区面积、高、中、低适生区面积均缩减。西藏虎头兰和虎头兰在 SSP5−8.5（2061−2100 年）情景下，总适生区和高适生区面积均明显缩减。寒兰的高适生区面积呈缩减趋势。蕙兰的总适生区和中适生区面积呈缩减趋势。春兰的总适生区面积在未来两种情景下，各阶段均呈缩减趋势，其中高、中适生区尤为明显。黄蝉兰和建兰的总适生区面积呈略微缩减趋势，其中高、中适生区面积在未来时间段波动较大，最后 2090s，在 SSP1−2.6 情景下高适生区面积减少，中适生区面积增加，但在 SSP5−8.5 情景下高适生区面积增加，中适生区面积减少。

2.1.4　20 种兰属植物的系统发育关系

基于叶绿体全基因组序列，以贵州地宝兰作为外群，构建了 20 种兰属植物的系统进化树（图 10）。构建的进化树分支的自展值多为 100%，表明叶绿体基因组序列构建的兰属植物关系具有高可信度。在系统进化树中，明确显示兰属植物聚成三大类，C1、C2 和 C3。其中 C1 支内的兰属植物为地生、地生或附生、腐生三种生活方式，C2、C3 支内的兰属植物均为附生植物。热图表示每种兰属植物的高、中适生区面积之和在 SSP1−2.6 和 SSP5−8.5 两种情景下，到 2100 年的变化情况，结果显示在每一大支和小支内均有分布区扩张和收缩的兰属植物。

表 1 研究所用的样本信息

Table 1 Information of sample used in the study

物种 Species	基因组大小 Genome size(bp)	GC 含量 GC content(%)	登录号 Accession number	习性 Habit
纹瓣兰 *Cymbidium aloifolium*	156 904	36.9	KC876122.1	附生 Epiphytic
冬凤兰 *C. dayanum*	155 408	36.8	MW160431.1	附生 Epiphytic
独占春 *C. eburneum*	156 520	36.7	MK820374.1	附生 Epiphytic
建兰 *C. ensifolium*	149 245	37.1	KU179434.1	地生 Terrestrial
长叶兰 *C. erythraeum*	156 327	36.8	MK820373.1	附生 Epiphytic
蕙兰 *C. faberi*	157 262	37.0	KR919606.1	地生 Terrestrial
多花兰 *C. floribludum*	153 998	36.8	MK848043.1	附生或极罕见地生 Epiphytic or rarely terrestrial
春兰 *C. goeringii*	157 192	36.9	KT722982.1	地生 Terrestrial
虎头兰 *C. hookerianum*	155 447	36.8	MT800927.1	附生 Epiphytic
寒兰 *C. kanran*	150 217	37.1	NC029711.1	地生 Terrestrial
兔耳兰 *C. lancifolium*	149 945	37.1	NC029712.1	地生或附生 Terrestrial or epiphytic
碧玉兰 *C. lowianum*	155 447	36.8	MT576628.1	附生 Epiphytic
大根兰 *C. macrorhizon*	149 850	37.0	KU179437.1	腐生 Holomycotrophic
硬叶兰 *C. mannii*	154 769	37.0	KC876126.1	附生 Epiphytic
豆瓣兰 *C. serratum*	149 998	37.1	MT273089.1	地生 Terrestrial
墨兰 *C. sinense*	155 548	37.0	KC876123.1	地生 Terrestrial
西藏虎头兰 *C. tracyanum*	156 286	36.8	NC021432.1	附生 Epiphytic
莎叶兰 *C. cyperifolium*	152 712	37.0	—	地生或附生 Terrestrial or epiphytic
莎草兰 *C. elegans*	155 411	36.8	—	附生 Epiphytic
黄蝉兰 *C. iridioides*	156 596	36.8	—	附生 Epiphytic
贵州地宝兰 *Geodorum eulophioides*	149 466	37.0	MK848065	地生 Terrestrial

表 2 九种气候情景下 20 种兰属植物 AUC 值

Table 2 AUC of 20 *Cymbidium* species for the nine climate scenarios

物种 Species	九种气候情景下的 AUC 值 AUC for the nine climate scenarios								
		SSP1−2.6				SSP5−8.5			
	现代 Current	2030s	2050s	2070s	2090s	2030s	2050s	2070s	2090s
兰属 *Cymbidium*	0.909	0.905	0.91	0.908	0.907	0.907	0.906	0.908	0.909
纹瓣兰 *C. aloifolium*	0.980	0.980	0.979	0.981	0.979	0.984	0.981	0.980	0.981
莎叶兰 *C. cyperifolium*	0.962	0.955	0.961	0.959	0.957	0.960	0.958	0.953	0.965
冬凤兰 *C. dayanum*	0.962	0.963	0.960	0.961	0.959	0.961	0.962	0.965	0.955
独占春 *C. eburneum*	0.976	0.977	0.978	0.974	0.976	0.978	0.973	0.974	0.976
莎草兰 *C. elegans*	0.969	0.974	0.975	0.974	0.971	0.974	0.968	0.970	0.971
建兰 *C. ensifolium*	0.938	0.935	0.937	0.934	0.937	0.936	0.940	0.931	0.938
长叶兰 *C. erythraeum*	0.956	0.969	0.965	0.963	0.969	0.972	0.964	0.961	0.965
蕙兰 *C. faberi*	0.899	0.910	0.911	0.903	0.908	0.906	0.902	0.900	0.908
多花兰 *C. floribludum*	0.946	0.947	0.949	0.950	0.946	0.951	0.946	0.946	0.950
春兰 *C. goeringii*	0.909	0.917	0.921	0.915	0.918	0.921	0.913	0.914	0.918
虎头兰 *C. hookerianum*	0.968	0.973	0.974	0.964	0.971	0.971	0.964	0.970	0.968
黄蝉兰 *C. iridioides*	0.978	0.977	0.980	0.974	0.977	0.979	0.973	0.976	0.975
寒兰 *C. kanran*	0.948	0.950	0.950	0.947	0.951	0.952	0.946	0.946	0.943
兔耳兰 *C. lancifolium*	0.959	0.967	0.966	0.963	0.965	0.965	0.964	0.960	0.959
碧玉兰 *C. lowianum*	0.990	0.992	0.989	0.990	0.990	0.987	0.988	0.989	0.988
大根兰 *C. macrorhizon*	0.904	0.907	0.915	0.929	0.849	0.876	0.855	0.853	0.895
硬叶兰 *C. mannii*	0.982	0.981	0.981	0.985	0.981	0.983	0.983	0.981	0.981
豆瓣兰 *C. serratum*	0.917	0.918	0.919	0.920	0.915	0.933	0.925	0.926	0.906
墨兰 *C. sinense*	0.971	0.967	0.968	0.969	0.971	0.974	0.968	0.969	0.970
西藏虎头兰 *C. tracyanum*	0.982	0.983	0.988	0.978	0.984	0.985	0.977	0.982	0.983

表 3 模拟兰属植物潜在适宜分布的主要气候因子及其贡献率

Table 3 Main climatic factors used for simulating suitable area of *Cymbidium* species and their contribution rate

变量代码 Variable code	Bio02	Bio03	Bio04	Bio06	Bio07	Bio11	Bio12	Bio14	Bio16	Bio17	Bio18
气候因子 (Environmental variable)	昼夜温差月均值 Mean Diurnal Range	等温性 Isothermality (Bio2 /Bio7)(× 100)	温度季节性变化 Temperature seasonality	最冷月份最低温度 Min temperature of coldest month	年温度变化范围 Temperature annual range	最冷季的平均温度 Mean Temperature of Coldest Quarter	年降水量 Annual precipitation	最干燥月份降水量 Precipitation of Driest Month	最湿润季降水量 Precipitation of Wettest Quarter	最干旱季降水量 Precipitation of driest quarter	最暖季降水量 Precipitation of warmest quarter
兰属 *Cymbidium*	—	—	7.2	—	—	—	28.4	—	—	46.3	—
冬凤兰 *C. dayanum*	—	—	32.9	—	—	42.4	—	—	—	—	—
独占春 *C. eburneum*	—	—	47.6	—	—	28.3	—	—	—	—	—
大根兰 *C. macrorhizon*	20.1	—		42.3	28.8	—	—	—	—	—	—
豆瓣兰 *C. serratum*	—	—	22.5	—	57.9	—	—	—	—	—	—
墨兰 *C. sinense*	—	—	—	—	—	—	—	—	19.8	34.3	—
纹瓣兰 *C. aloifolium*	—	—	—	—	—	10.7	—		22.4	29.8	—
兔耳兰 *C. lancifolium*	—	—	—	—	—	—	—	—	—	45.1	21.6
碧玉兰 *C. lowianum*	—	56.4	19.2	—	—	—	—	—	—	—	—
黄蝉兰 *C. iridioides*	—	31.6	43.2	—	—	—	—	—	—	—	—
西藏虎头兰 *C. tracyanum*	—	16.3	26.9	—	—	—	—	—	—	22.4	21.4
长叶兰 *C. erythraeum*	—	29.8	31.9	30.4	—	—	—	—	—	—	—
莎草兰 *C. elegans*	—	20.5	31.2	35.4	—	—	—	—	—	—	—
莎叶兰 *C. cyperifolium*	—	—	12.1	—	21	—	—	—	—	33.6	—
虎头兰 *C. hookerianum*	—	—	37	—	—	—	—	—	—	—	16.8
硬叶兰 *C. mannii*	—	—	—	—	—	43.7	—	—	—	—	—
春兰 *C. goeringii*	—	—	—	14.4	—	—	32	36.1	—	—	—
蕙兰 *C. faberi*	—	—	—	16.8	—	—	43.2	—	—	16.1	—
寒兰 *C. kanran*	—	—	—	—	—	—	20.8	—	14.4	46.1	—
建兰 *C. ensifolium*	—	—	—	—	—	—	30.7	—	—	35.5	—

多花兰 *C. floribludum*	—	—	—	—	—	—	15.2	—	—	61.1	—

注：表格中的数字表示各气候因子对该物种的模拟分布贡献率大小（%）；“-”表示该气候因子对该物种的模拟分布贡献率较小。

Note: the numbers in the table mean the contribution rate of climatic factors to the species simulating distribution (%); “-” means low contribution rate of the climatic factor to the specie simulating distribution.

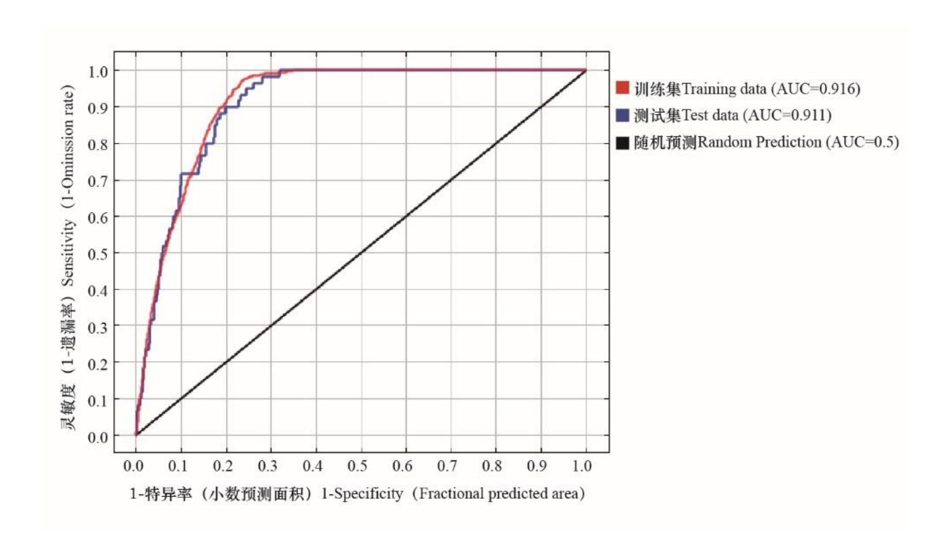


图 1 当前气候情景下 Maxent 模型预测结果 ROC 曲线

Fig.1 ROC curve verification of Maxent prediction under the current climate scenario

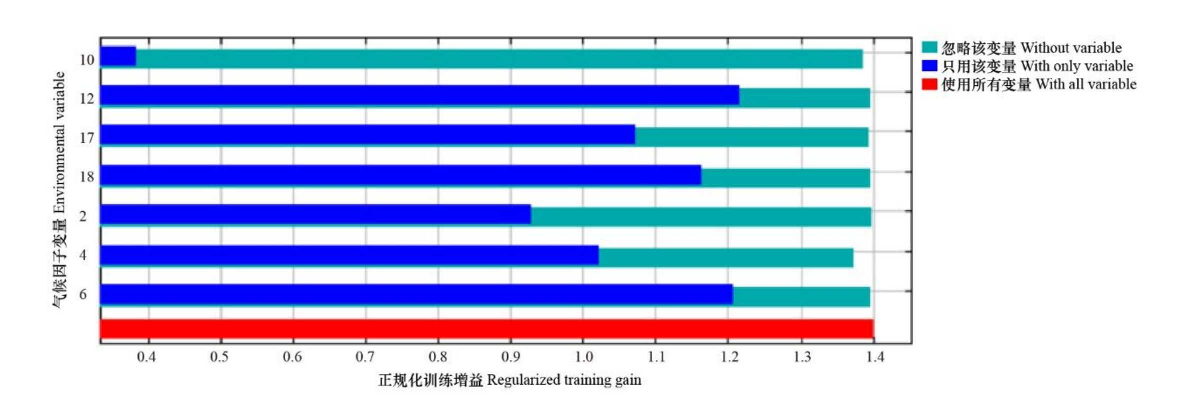


图 2 刀切法检验的各气候因子对兰属植物分布影响的重要性

Fig 2. Contribution of various environmental variables based on Jackknife test

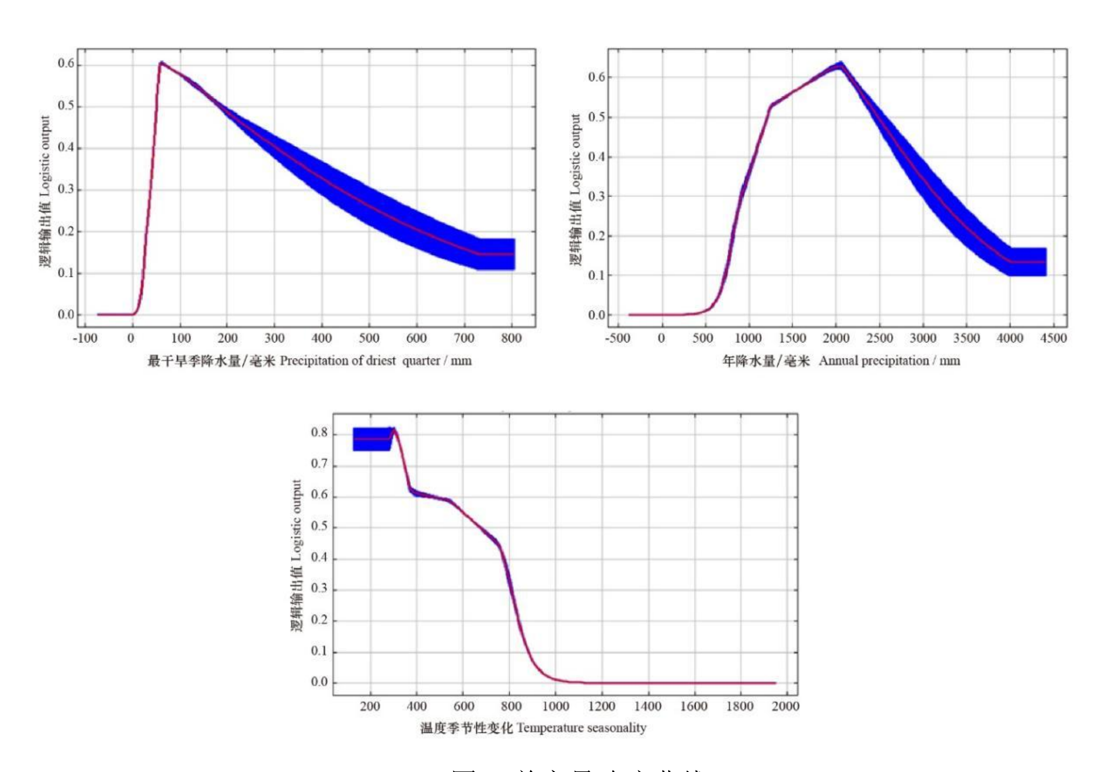
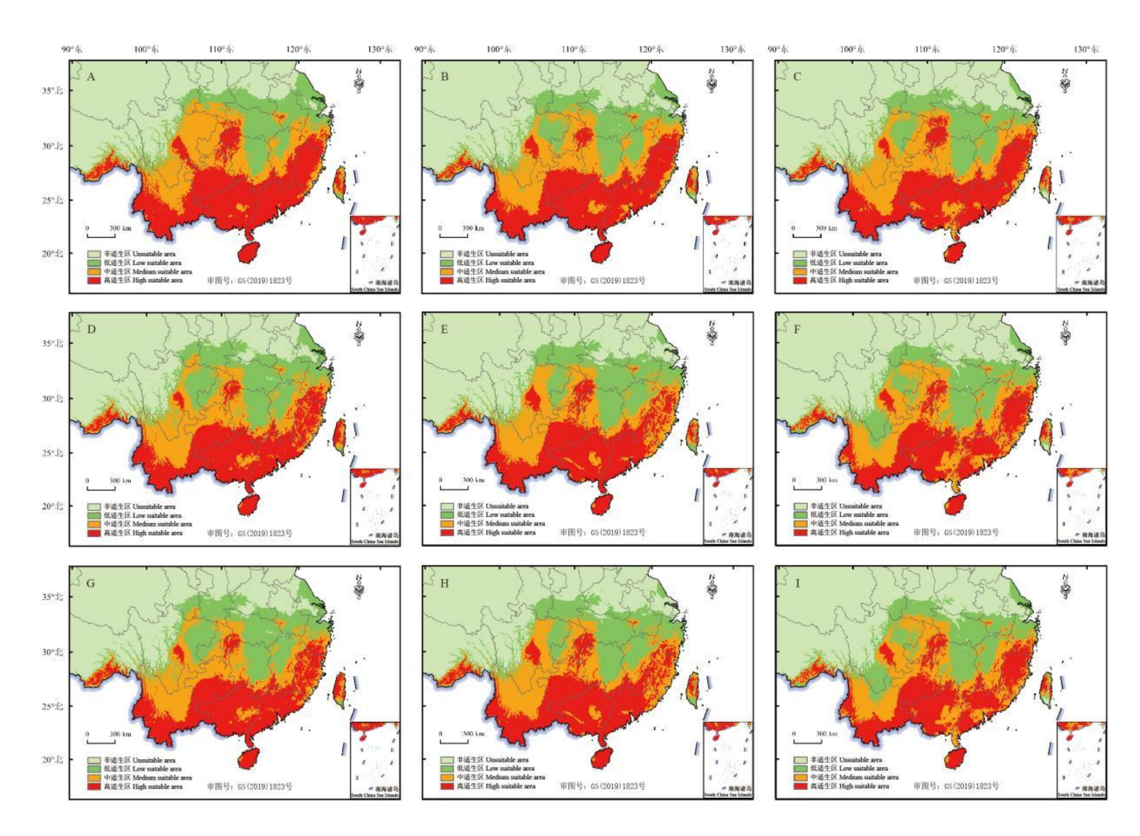


图 3 单变量响应曲线

Fig.3 Single variable response curve



A−I 依次为现代 1970−2000 年、未来 2030s、2050s、2070s 和 2090s 在 SSP1−2.6 和 SSP5−8.5 情景下的兰属植物的分布格局。下同。

A−I shows the potential distribution pattern of *Cymbidium* under the scenarios of Current, SSP1−2.6 and SP5−8.5 in future 2030s, 2050s, 2070s and 2090s, respectively. The same below.

图 4 不同气候变化情景下兰属的潜在分布格局

Fig. 4 Potential distribution pattern of *Cymbidium* under different climatic scenarios

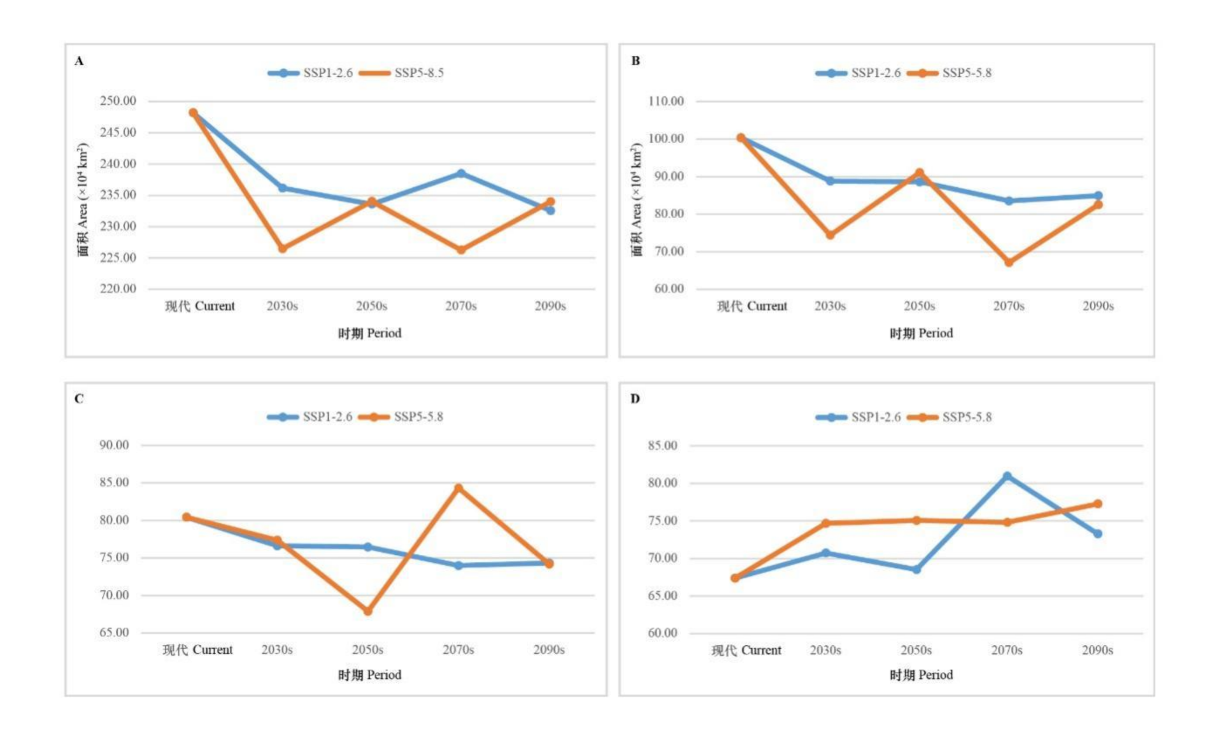


图 5 不同时期兰属植物的适生区变化

Fig. 5 Change of the suitable range of of *Cymbidium* in different periods

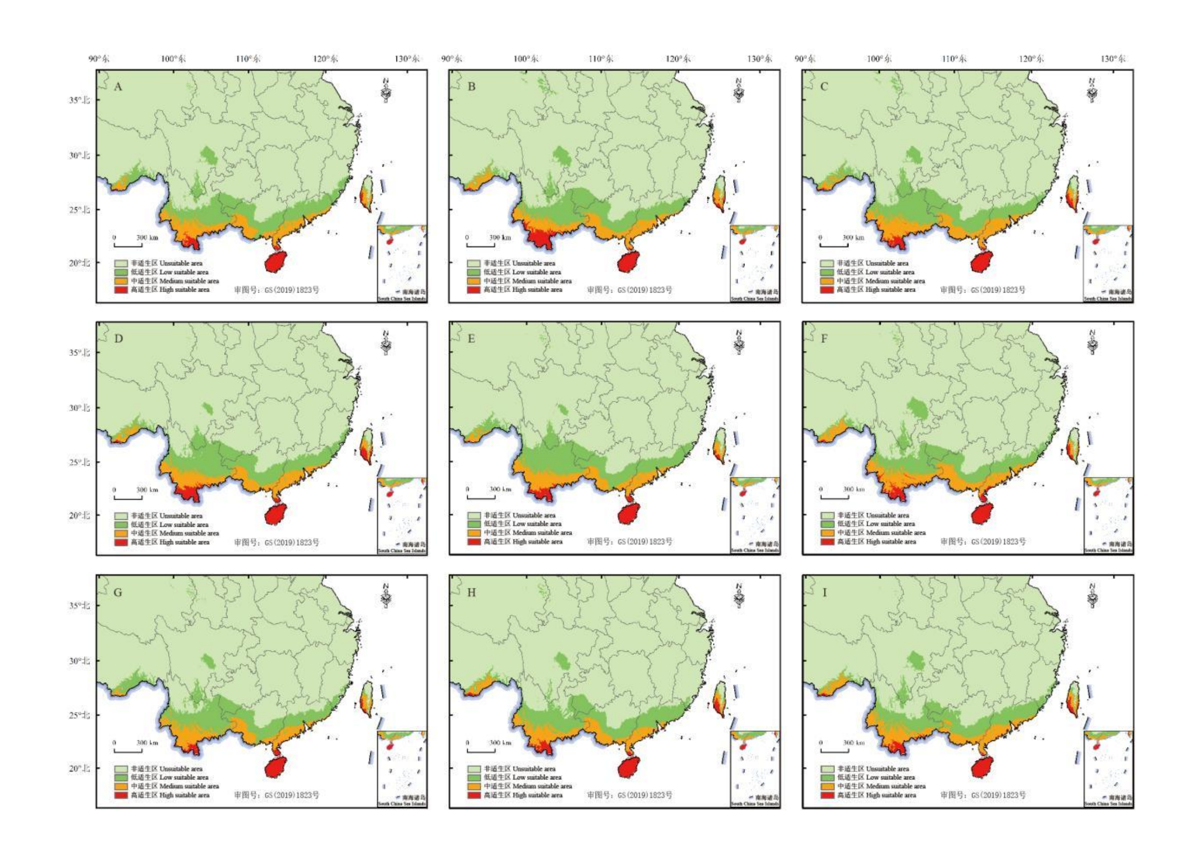


图 6 不同气候变化情景下冬凤兰的潜在分布格局

Fig. 6 Potential distribution pattern of *C. dayanum* under different climatic scenarios

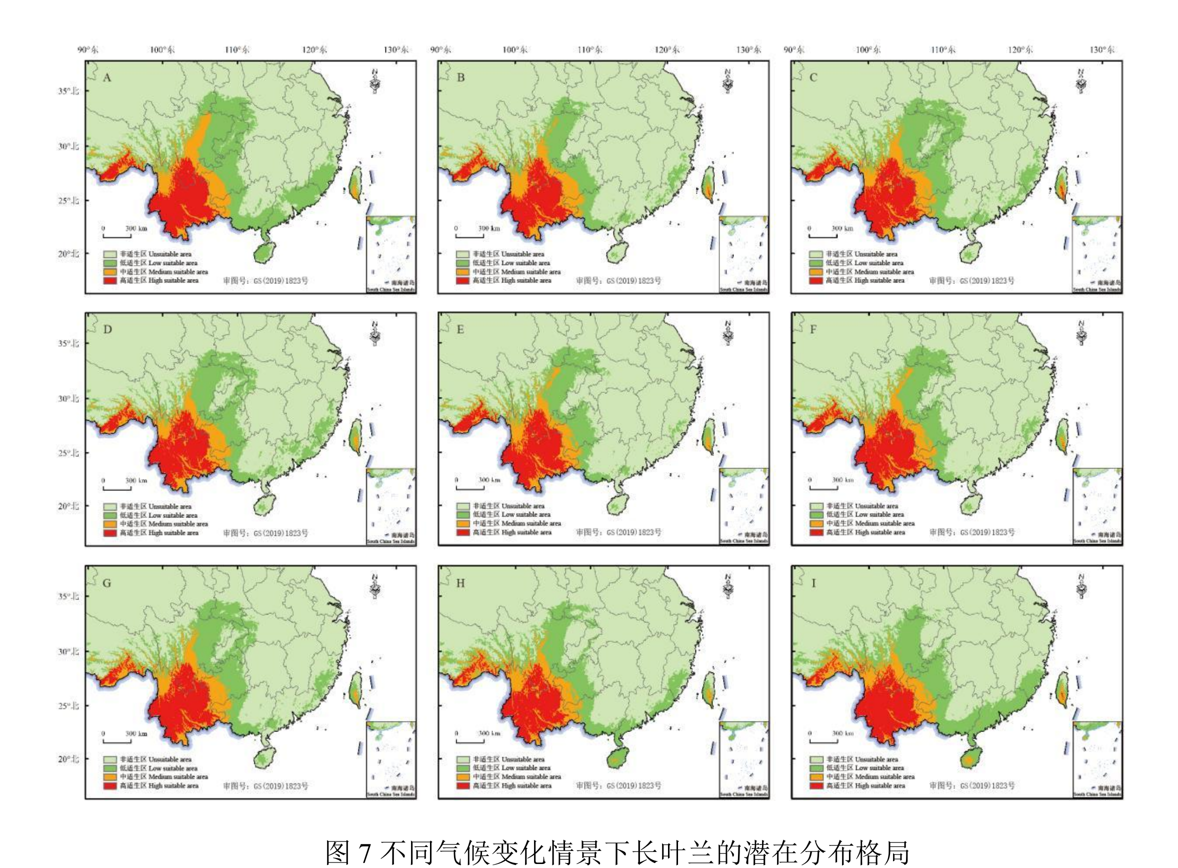


图 7 不同气候变化情景下长叶兰的潜在分布格局

Fig. 7 Potential distribution pattern of *C. erythraeum* under different climatic scenarios

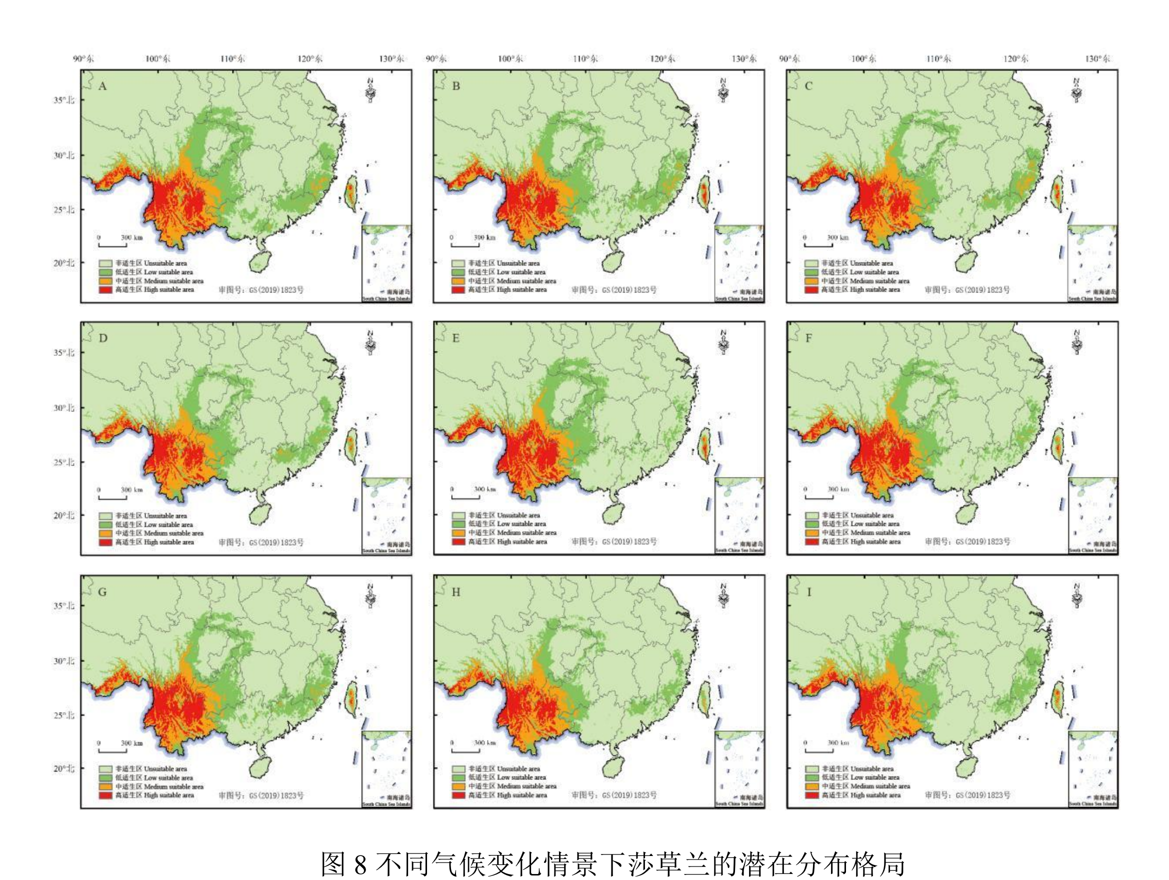


图 8 不同气候变化情景下莎草兰的潜在分布格局

Fig. 8 Potential distribution pattern of *C. elegans* under different climatic scenarios

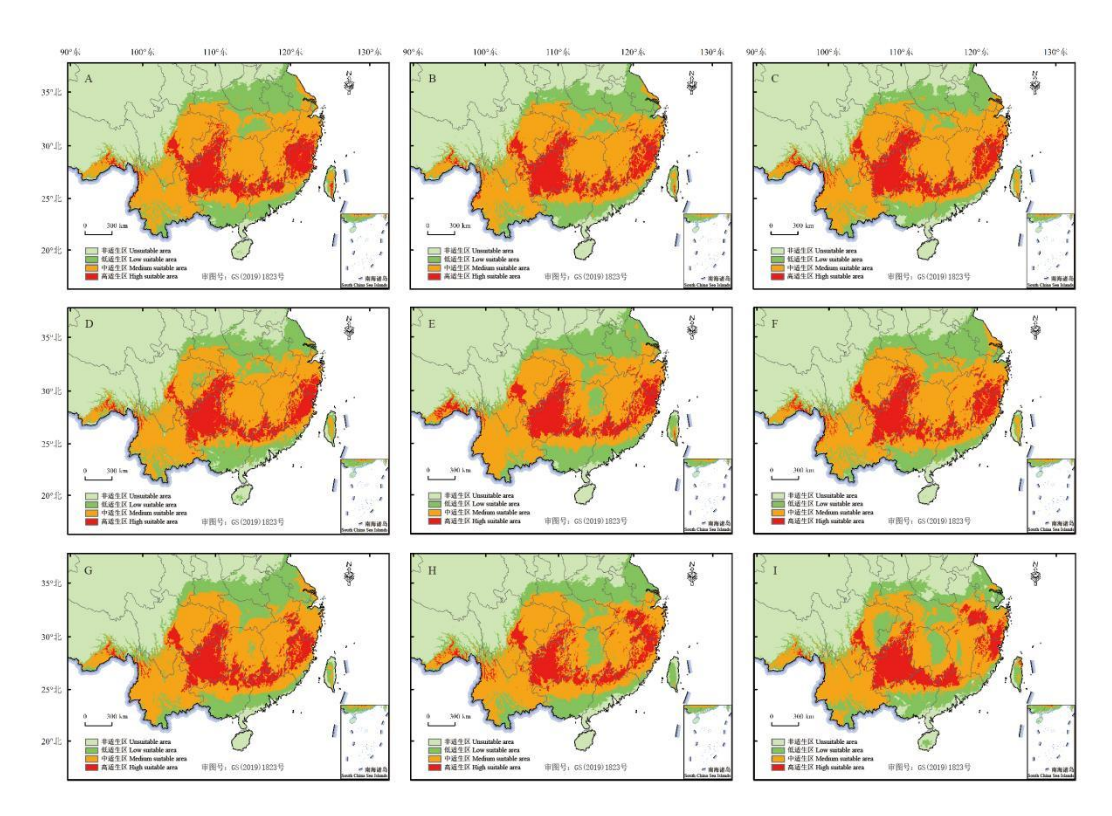


图 9 不同气候变化情景下春兰的潜在分布格局

Fig. 9 Potential distribution pattern of *C. goeringii* under different climatic scenarios

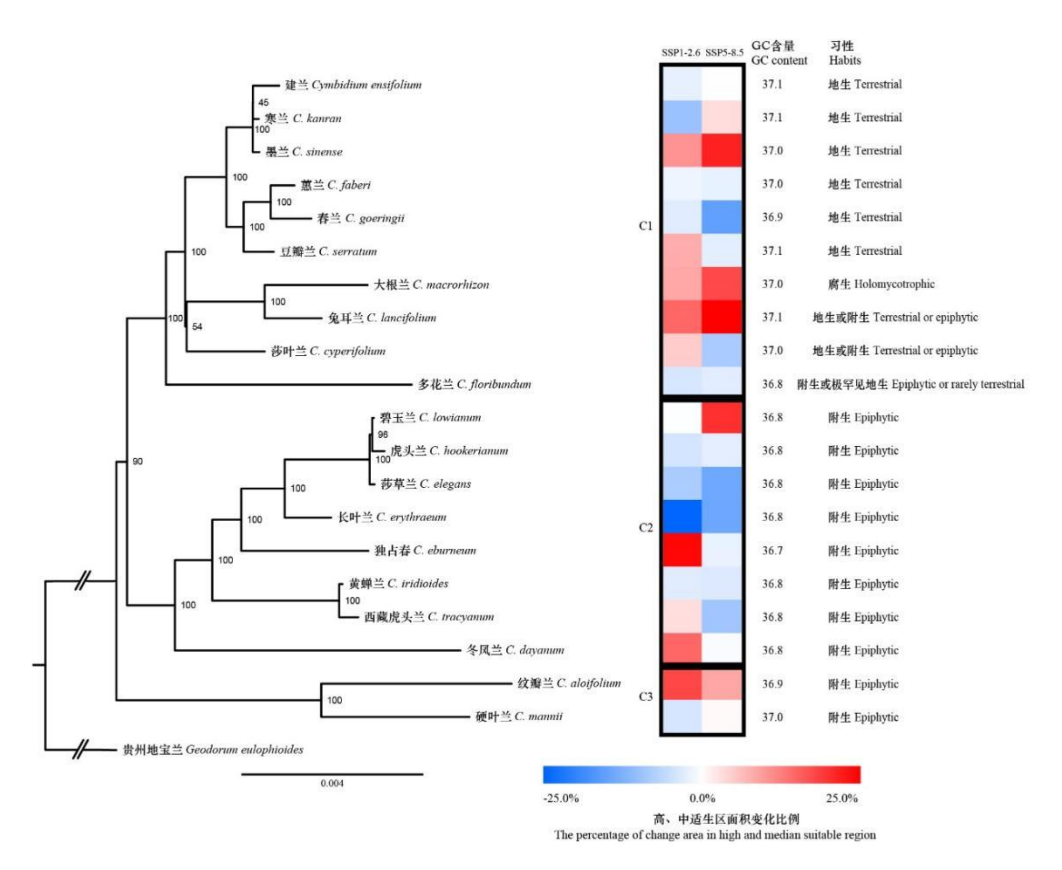


图 10 基于叶绿体基因组序列构建的兰属植物系统进化树

Fig. 10 The consensus phylogenetic tree of *Cymbidium* species based on whole chloroplast genome sequences

3 讨论

物种的分布区是物种重要的空间特征，与物种灭绝、生态入侵、生态位幅度密切相关，对研究物种的起源、扩散和演化具有重要意义。在全球变化的背景下，进行物种潜在分布区的模拟和主导因子分析，可以为有效保护和可持续利用植物资源提供科学依据。对于众多现存的珍稀濒危物种而言，物种分布区的潜在收缩或扩张趋势，对于这些珍稀濒危物种的保护尤其具有更重要的意义。

本研究利用最大熵模型来模拟兰属植物在现代和未来气候情景（SSP1−2.6, SSP5−8.5）下的潜在分布格局。结果表明，在未来气候变化下，兰属植物整个属的潜在分布区面积呈缩减趋势，且高适生区面积大幅缩减，八种情景下缩减 9.26%~33.08%。中适生区面积在两种情景下到 2100 年缩减 7.57%和 7.77%，但低适生区面积呈扩张趋势，不同情景和时间段下，面积增加 1.68%~20.15%。对兰属地理分布影响较大的气候因子为：最干旱季降水量（46.3%）、年降水量（28.4%）和温度季节性变化（Bio04）。

随着全球气温升高，中国区域极端降水发生频率增强，而 SSP5−8.5 情景相比于其他低温室气体排放浓度情景，降水强度的增幅更大，且我国西南地区降水强度增加更为显著（陈晓晨等, 2015），这说明兰属整体在未来气候情境下对极端降水不适应。但是本研究采用 20 种兰属植物，它们之间生活习性差别较大，所以各种兰属植物的空间格局变化各不相同。

冬凤兰现代潜在适生区除了与实际现存野生种群分布区较一致的广东、广西，海南、台湾和云南南部以外，还分布于西藏南部，但广泛分布的福建南部却仅有少量低适生区。未来气候变化情境下，高适生区呈扩张趋势，逐渐集中连续分布，主要向高纬度地区扩张，西藏南部地区和台湾地区的高适生区扩张明显。推测是气候变化导致高适生区面积增加，在未来全球气候变暖的情境下，中国年平均气温上升 1.6℃~5.0℃，年降水量增加 1.5%~2.0%（李垚等，2016），影响冬凤兰适生区分布的主要气候因子是温度季节性变化（Bio4）和最冷季的平均温度（Bio11），因此在未来气温变暖情况下，冬凤兰的高适生区分布逐渐向北方扩张。

长叶兰和莎草兰现代潜在适生区除了与现存记录相符的西藏东南部、云南、四川西南部和贵州中部至西南部之外，还广泛分布于广东、广西的沿海地区，以及台湾地区。根据气候因子贡献率的结果，等温性（Bio03）、温度季节性变化（Bio04）和最冷月份最低温度（Bio06）是影响长叶兰和莎草兰的主要气候因子，三者对它们的贡献率分别达到 92.1%和 87.1%。在未来气候条件下，它们的适生区面积呈缩减趋势，整体向云南和西藏东南部这些高海拔地区迁移，这可能与云南省气候带的变化有关，程建刚等（2009）研究表明，近年来，云南的气候带面积中热带面积增加、而北亚热带和温带面积减少，气候带呈北移趋势，但向高海拔地区扩展的趋势更加明显。

春兰的总适生区面积在八种未来情景下均呈减少趋势。其中，高适生区面积在两种不同排放情景下，不同未来阶段都呈现先上升后下降的趋势，这可能与不同排放情景下所造成的

温度与降雨变化有关。在 SSP1−2.6 情景下，2061−2080 年，高、中适生区扩张，而低适生区缩减，在 2081−2100 年，高适生区缩减 10.4%，变化为中、低适生区。在 SSP5−8.5 情景下，2061−2080 年，高适生区扩张 5.94%，而中低适生区缩减，在 2081−2100 年，高、中适生区分别缩减 11.27%和 18.03%，低适生区扩张 4.54%。这说明随着 CO_2 排放，环境越来越不适宜春兰的生长繁殖。

结合系统发育树，发现分布区面积变化趋势与系统发育关系的联系并不明显。亲缘关系较近的物种在未来情景下，分布区有扩张和收缩之分。这符合生态位法则，即亲缘关系接近的，具有同样生活习性的物种，不会在同一地方竞争同一生存空间。总的来说，系统发育树上的 C1 支的兰科植物多为地生植物，叶绿体基因的 GC 含量较高，适生区面积多为扩张趋势。C2 支的兰科植物为附生植物，叶绿体基因的 GC 含量较低，适生区面积多为收缩趋势。

全球气候变暖情况下，各地干旱和极端降雨频发，将深刻影响森林分布（时明芝，2011），进而影响附生的兰属植物的分布。

与现代气候相比，未来气候情景下兰属植物从属的水平来看呈现缩减趋势，但从物种水平来看，不同植物的分布区变化规律并不一致，其分布格局响应气候变化的趋势有所不同，由于植物的实际分布格局受到多方面的影响，进一步的研究可考虑地形、土壤条件、海拔、人为活动等因素。

为什么不同的物种在相同的气候变化变化情境下具有不同的分布区变化趋势？显然，这是物种本身现有的地理分布格局所致；然而，物种本身的现有地理分布格局与物种本身的生物学、生态学习性具有怎样的关联？——什么样的物种分布区会收缩或者扩张？这是全球气候变化对物种分布区影响评价中关心的核心问题。目前，大多数学者认为在全球变暖情景下，物种的适生区面积将不断减少，且逐渐向高纬度和高海拔地区迁移（Parmesan, 2006），如：邱浩杰等（2020）对鹅掌楸（*Liriodendron chinense*）在中国的分布预测发现其适宜分布区面积不断减少，且有向高纬度轻微移动的趋势；张涛等（2022）发现从末次盛冰期至未来气候情境下，苦参（*Sophora flavescens*）在我国的适宜生境面积逐渐减少，且整体有向高纬度地区移动的趋势。但也有学者提出不同的结论，陈俊俊等（2016）发现，在未来气候情景模式下，短花针茅（*Stipa breviflora*）的适生区面积较现在有所增加，且向高纬度地区移动；朱梦婕等（2020）发现在未来气候条件下狸尾豆属植物潜在分布区面积增加，高适生区向北推移。

兰属所有野生种均被列入《濒危野生动植物种国际贸易公约》（CITES）附录 II 中，除兔耳兰外也都被列入《国家重点保护野生植物（第二批）》名录中。造成兰属植物濒危的主要原因除来自大量采挖活动外，主要来自于人们对生境的过度破坏，使其生长空间被完全剥夺或生长环境受到人为颠覆性的改变。

根据潜在分布区预测发现兔耳兰、碧玉兰、冬凤兰、大根兰、墨兰、豆瓣兰、独占春、纹瓣兰等在未来情境下呈扩张趋势，保护这类植物要从保护其原有生境入手。对于兰属植物

分布密集地区，应当扩大当地国家级自然保护区的面积，减少保护空缺区域，或将省级、县级自然保护区升级为国家级保护区，消除人为经济活动对其生存构成的威胁，以维持生境的稳定和连续，并满足附生所需灌木林等的生长条件，实行综合性的保护，为传粉昆虫生长提供环境保证。对于未来情景下缩减明显的莎草兰、长叶兰、硬叶兰、多花兰等这类兰属植物，根据预测结果推断未来适生区稳定存在的地区可能成为其将来应对气候变化的避难所，我们应特别重视对这些区域的自然生境保护，除此以外，可以考虑进行人工繁育后回归原有生境或者进行迁地保护。综上，潜在分布区预测的研究能为珍稀濒危兰属植物提出合理、有效的保护对策。

参考文献：

ADHIKARI D, BARIK S, UPADHAYA K, 2012. Habitat distribution modelling for reintroduction of Ilex khasiana Purk., a critically endangered tree species of northeastern India [J]. Ecol Eng, 40: 37−43.

BELLARD C, BERTELSMEIER C, LEADLEY P, et al., 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity [J]. Ecol Lett, 15(4): 365−377.

BERTIN RI, 2008. Plant phenology and distribution in relation to recent climate change [J]. J Torrey Bot Soc, 135(1): 126−146.

BI GQ, MAO YX, XING QK, et al., 2017. HomBlocks: A multiple-alignment construction pipeline for organelle phylogenomics based on locally collinear block searching, Genomics.

CHEN DM, KANG HZ, LIU CJ, 2011. An overview on the potential Quaternary Glacial Refugia of plants in China Mainland [J]. Bull Bot Res, 31(5) : 623−632. [陈冬梅，康宏樟，刘春江，2011. 中国大陆第四纪冰期潜在植物避难所研究进展[J]. 植物研究，31（5）：623-632.]

CHEN JJ, YAN YY, CONG RH, et al., 2016. Prediction of Potential Distribution of *Stipa breviflorain* China Based on MaxEnt Model [J]. Chin J Grassland, 38(5): 78−84. [陈俊俊，燕亚媛，丛日慧，等，2016. 基于 MaxEnt 模型的短花针茅在中国的潜在分布区研究及预估[J]. 中国草地学报，38（5）：78-84.]

CHEN SC, 1999. *Cymbidium*. The Flora of China [M]. Science Press: Beijing, China: 17: 52−72. [陈心启，1999. 兰属. 中国植物志[M]. 北京:科学出版社. 17：52-72.]

CHEN XC, XU Y, YAO Y, 2015. Changes in Climate Extremes over China in a 2°C, 3°C, and 4°C Warmer World [J]. Chin J Atmos Sci, 39(6): 1123−1135. [陈晓晨，徐影，姚遥，2015. 不同升温阈值下中国地区极端气候事件变化预估[J]. 大气科学，39（6）：1123-1135.]

CHENG JG, WANG XXF, FAN LZ, et al., 2009. Variations of Yunnan Climatic Zones in Recent 50 Years [J]. Prog Geogr 28(1): 18−24. [程建刚，王学锋，范立张，等，2009. 近 50 年来云南气候带的变化特征[J]. 地理科学进展，28（1）：18-24.]

DENG F, LI XB, WANG H, et al., 2014. The suitability of geographic distribution and the dominant factors of *alfalfa* based on MaxEnt model in Xilin Gol [J]. Pratacultural Sci, 31(10):

1840−1847. [邓飞，李晓兵，王宏，等，2014. 基于 Maxent 模型评价紫花苜蓿在锡林郭勒盟的分布适宜性及主导因子[J]. 草业科学，31（10）：1840-1847.]

ELITH J, LEATHWICK JR, 2009. Species distribution models: ecological explanation and prediction across space and time [M]. Ann Agric Environ Med: 677−697.

GUO J, LIU XP, ZHANG Q, et al., 2017. Prediction for the potential distribution area of *Codonopsis pilosula* at global scale based on Maxent model [J]. Chin J Appl Ecol, 28(3): 992−1000. [郭杰，刘小平，张琴，等，2017. 基于 Maxent 模型的党参全球潜在分布区预测[J]. 应用生态学报，28（3）：992-1000.]

HU XG, JIN Y, WANG XR, et al., 2015. Predicting impacts of future climate change on the distribution of the widespread conifer *Platycladus orientalis* [J]. PLoS ONE, 10(7): e0132326.

HUANG RZ, YU T, ZHAO H, et al., 2021. Prediction of suitable distribution area of the endangered plant *Acer catalpifolium* under the background of climate change in China [J]. J Beijing ForUniv, 43(5): 33−43. [黄睿智，于涛，赵辉，等，2021. 气候变化背景下濒危植物梓叶槭在中国适生分布区预测[J]. 北京林业大学学报，43（5）：33-43.]

HUNT P F, 1970. Notes on asiatic orchis 5[J]. Kew bull, 24: 93−94.

IPCC, 2014. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland:151 .

KALYAANAMOORTHY S, MINH BQ, WONG TKF, et al., 2017. ModelFinder: Fast Model Selection for Accurate Phylogenetic Estimates [J]. Nat Methods, 14: 587–589.

LI Y, ZHANG XW, FANG YM, 2016. Responses of the distribution pattern of *Quercus chenii* to climate change following the Last Glacial Maximum [J]. Chin J Plant Ecol, 40(11): 1164−1178. [李垚，张兴旺，方炎明，2016. 小叶栎分布格局对末次盛冰期以来气候变化的响应[J]. 植物生态学报，40（11）：1164-1178.]

LIANG HY, JIANG XL, KONG YH, et al., 2018. Prediction of the potential geographical distribution of *Cymbidium goeringii* and *C. faberi* under the background of global warming [J]. Acta Ecol Sin, 38(23): 8345−8353. [梁红艳，姜效雷，孔玉华，等，2018. 气候变暖背景下春兰和蕙兰的适生区分布预测[J]. 生态学报，38（23）：8345-8353.]

LIU ZJ, CHEN SC, 2002. *Cymbidium paucifolium*, A New Species of Orchidaceae from China [J]. J Wuhan Bot Res, (5):350−352. [刘仲健，陈心启，2002. 少叶硬叶兰，中国兰科一新种[J]. 武汉植物学研究（5）：350-352.]

LIU ZJ, CHEN SC, 2004. *Cymbidium micranthum*, A New Orchid from Yunnan, China [J]. J Wuhan Botl Res, (6): 500−502. [刘仲健，陈心启，2004b. 细花兰，中国云南兰科一新种[J]. 武汉植物学研究，（6）：500-502.]

LIU ZJ, CHEN SC, RU ZZ, 2005. *Cymbidium changningense*, a New Species of Orchidaceae

from Yunnan, China [J]. Acta Bot Yunnanica, (4): 378−380. [刘仲健，陈心启，茹正忠，2005. 中国云南兰科一新种——昌宁兰[J]. 云南植物研究，(4)：378-380.]

LIU ZJ, CHEN SC, RU ZZ et al., 2006. The Genus *Cymbidium* in China [M]. Beijing, Science Press: 10−13. [刘仲健，陈心启，茹正忠，等，2006. 中国兰属植物[M]. 北京：科学出版社：10-13.]

LIU ZJ, ZHANG JN, 1998. Five new species of *Cymbidium* from Asia [J]. J S China Agr Univ, (3): 114−118. [刘仲健，张景宁，1998. 亚洲兰属植物五新种[J]. 华南农业大学学报，(3)：114-118.]

LONG CL, DAO Z L, LI H, 2003. A new species of *Cymbidium* (Orchidaceae) from Tibet (Xizang), China [J]. Novon, 13 (2): 203−205.

PARMESAN C, 2006. Ecological and evolutionary responses to recent climate change [J]. Annu Rev Ecol Evol Syst, 37: 637–669.

PHILLIPS SJ, ANDERSON RP, SCHAPIRE R E, 2006. Maximum entropy modeling of species geographic distributions [J]. Ecol Model, 190(3−4): 231−259.

QIN DH, CHEN ZL, LUO Y, et al., 2017. Updated Understanding of Climate Change Sciences [J]. Adv Clim Change Res, 3(2): 63−73. [秦大河，陈振林，罗勇，等，2007. 气候变化科学的最新认知[J]. 气候变化研究进展，3（2）：63-73.]

QIU HJ, SUN JJ, XU D, et al., 2020. MaxEnt model−based prediction of potential distribution of *Liriodendron chinense* in China [J]. J Zhejiang A & F Univ, 37(1): 1−8. [邱浩杰，孙杰杰，徐达，等，2020. 基于 MaxEnt 模型预测鹅掌楸在中国的潜在分布区[J]. 浙江农林大学学报，37（1）：1-8.]

ROBERT PA, RAZA A, 2010. The effect of the extent of the study region on GIS models of species geographic distributions and estimates of nicheevolution: preliminary tests with montane rodents（genus Nephelomys）in Venezuela [J]. J Biogeogr, 37(7): 1378−1393.

ROOT TL, PRICE JT, HALL KR, et al., 2003. Fingerprints of global warming on wild animals and plants [J]. Nature, 421(6918): 57−60.

SHEN YP, WANG GY, 2013. Key findings and assessment results of IPCC WGI Fifth Assessment Report [J]. J Glaciology Geocryology, 35(5): 1068−1076. [沈永平，王国亚，2013. IPCC 第一工作组第五次评估报告对全球气候变化认知的最新科学要点[J].冰川冻土,35(5)：1068-1076.]

SHI MZ, 2011. The influence of the global climate change on forests in China [J]. China Popul, Resour Environ, 21 (7): 68−72. [时明芝，2011. 全球气候变化对中国森林影响的研究进展[J]. 中国人口·资源与环境，21（7）：68-72.]

SUNIL K, THOMAS JS, 2009. Maxent modeling for predicting suitable habitat for threatened and endangered tree Canacomyrica monticola in New Caledonia [J]. J Ecol Environ, 1(4): 94−98.

TAN X, ZHANG L, ZHANG AP, et al., 2018. The suitable distribution area of *Tsuga*

longibracteata revealed by a climate and spatial constraint model under future climate change scenarios [J]. Acta Ecol Sin, 38(24) : 8934−8945. [谭雪，张林，张爱平，等，2018. 孑遗植物长苞铁杉（ *Tsuga longibracteata*） 分布格局对未来气候变化的响应[J]. 生态学报，38（24）： 8934-8945.]

THOMAS CD, CAMERON A, GREEN RE, et al., 2004. Extinction risk from climate change [J]. Nature, 427(6970): 145−148.

TRIFINOPOULOS J, NGUYEN LT, HAESELER A, et al., 2016. W−IQ−TREE: a fast online phylogenetic tool for maximum likelihood analysis [J]. Nucl Acid Res, 44 (W1): W232−W235.

VELOZ SD, WILLIAMS JW, BLOIS JL, et al., 2012. No−analog climates and shifting realized niches during the late quaternary: implications for 21st−century predictions by species distribution models [J]. Glob Change Biol, 18(5): 1698−1713.

XU ZL, PENG HH, PENG SZ, 2015. The development and evaluation of species distribution models [J]. Acta Ecol Sin, 35(2): 557−567. [许仲林，彭焕华，彭守璋，2015. 物种分布模型的发展及评价方法[J]. 生态学报，35（2）：557-567.]

YANG CP, ZHAO X, WANG JW, et al., 2020. Predicting the Future Cultivation Regions of *Cyrtotrachelus Buqueti* Using MaxEnt Model under Climate Change in China [J]. J Sichuan Agr Univ, 38(6): 755−763. [杨春平，赵霞，王嘉雯，等，2020. 基于 MaxEnt 模型的长足大竹象在中国潜在分布区及其对气候变化的响应[J]. 四川农业大学学报，38（6）：755-763.]

YANG JB, TANG M, LI HT, et al., 2013. Complete chloroplast genome of the genus *Cymbidium*: lights into the species identification, phylogenetic implications and population genetic analyses [J]. Bmc Evol Biol, 13(1): 84.

ZHANG JQ, XU ZP, WAN T, et al., 2019. Study on potential distribution areas of *Gymnocarpos przewalskii* in China under future climatic conditions [J]. J Plant Resour Environ, 28(3): 51−57. [张佳琦，徐振朋，宛涛，等，2019. 未来气候条件下裸果木在中国的潜在分布区研究[J]. 植物资源与环境学报，28（3）：51-57.]

ZHANG T, HU W, JIA TJ, et al., 2022. Prediction of potential distribution of *Sophora flavescens* in China under climate change [J]. Guihaia, 42(2): 349−362. [张涛，胡菀，贾天娇，等，2022. 气候变化条件下苦参在我国潜在分布区的预测分析[J]. 广西植物，42(2): 349−362. .]

ZHOU HT, NA XD, ZANG SY, et al., 2016. Applications of Maximum Entropy (Maxent) Model in Species Habitat Study [J]. Environ Sci Manage. 41(3): 149−151. [周海涛，那晓东，臧淑英，等，2016. 最大熵（ Maxent） 模型在物种栖息地研究中的应用[J]. 环境科学与管理，41（3）：149-151.]

ZHOU Y, YI YJ, YANG YF, et al., 2019. Predicting geographical distributions of *Homonoia*

riparia Lour by using Maximum Entropy [J]. Water Resour Hydropower Eng, 50(10): 73−81. [周扬，易雨君，杨雨风，等，2019. 基于最大熵模型预测水杨柳的潜在生境分布[J]. 水利水电技术，50（10）：73-81.]

ZHU MJ, MIAO J, ZHAO XL, 2020. Simulation of potential distribution of *Uraria* in China based on maximum entropy model [J]. Plant Sci J, 38(4): 476−482. [朱梦婕，缪佳，赵雪利，2020. 基于最大熵模型的狸尾豆属植物在中国的潜在分布区模拟[J]. 植物科学学报，38（4）：476-482.]

附录 1 不同气候变化情景下兰属植物适生区面积及其动态变化

Appendix 1：Dynamics of changes in suitable habitat area of *Cymbidium* under different climate scenario

物种 Species	气候情景 Climate scenarios	时段 Period	总适生面积 Total suitable area($\times10^4$ km^2)	面积变化 Area change	高度适生面积 Highly suitable Area ($\times10^4$ km^2)	面积变化 Area change	中度适生面积 Moderately suitable Area ($\times10^4$ km^2)	面积变化 Area change	低度适生面积 Marginally suitable Area ($\times10^4$ km^2)	面积变化 Area change	非适生区面积 Unsuitable Area ($\times10^4$ km^2)	面积变化 Area change
兰属 *Cymbidium*	—	现代 Current	248.18	—	100.37	—	80.43	—	67.39	—	713.89	—
	SSP1—2.6	2030s	236.16	-4.84%	88.82	-11.51%	76.62	-4.74%	70.72	4.95%	725.91	1.68%
		2050s	233.60	-5.88%	88.62	-11.70%	76.46	-4.93%	68.52	1.68%	728.47	2.04%
		2070s	238.49	-3.90%	83.54	-16.77%	73.99	-8.00%	80.96	20.15%	723.58	1.36%
		2090s	232.55	-6.30%	84.94	-15.37%	74.34	-7.57%	73.28	8.74%	729.51	2.19%
	SSP5-8.5	2030s	226.48	-8.74%	74.45	-25.83%	77.37	-3.80%	74.67	10.81%	735.59	3.04%
		2050s	234.05	-5.70%	91.08	-9.26%	67.91	-15.57%	75.06	11.39%	728.02	1.98%
		2070s	226.27	-8.83%	67.17	-33.08%	84.30	4.81%	74.81	11.01%	735.80	3.07%
		2090s	234.00	-5.71%	82.56	-17.75%	74.18	-7.77%	77.27	14.67%	728.06	1.99%
冬凤兰 *C. dayanum*	—	现代 Current	64.66	—	5.08	—	19.44	—	40.15	—	897.41	—
	SSP1-2.6	2030s	74.23	14.81%	8.85	74.29%	21.22	9.20%	44.16	9.99%	887.84	-1.07%
		2050s	72.63	12.33%	6.96	37.03%	21.87	12.51%	43.80	9.11%	889.44	-0.89%
		2070s	76.27	17.95%	7.83	54.26%	22.38	15.13%	46.06	14.73%	885.80	-1.29%
		2090s	73.04	12.96%	6.76	33.09%	21.42	10.23%	44.86	11.74%	889.03	-0.93%
	SSP5-8.5	2030s	79.07	22.29%	8.47	66.74%	22.36	15.05%	48.24	20.17%	883.00	-1.61%
		2050s	60.86	-5.88%	4.74	-6.74%	17.18	-11.60%	38.94	-3.00%	901.21	0.42%
		2070s	69.36	7.28%	5.73	12.89%	19.06	-1.91%	44.57	11.01%	892.70	-0.52%
		2090s	61.82	-4.40%	5.60	10.32%	18.78	-3.37%	37.43	-6.76%	900.25	0.32%
	—	现代 Current	128.71	—	21.98	—	33.24	—	73.49	—	833.35	—

兔耳兰 *C. lancifolium*	SSP1-2.6	2030s	136.30	5.89%	24.26	10.37%	35.83	7.79%	76.21	3.70%	825.77	-0.91%
		2050s	128.95	0.18%	23.13	5.24%	38.68	16.35%	67.14	-8.64%	833.12	-0.03%
		2070s	123.51	-4.04%	22.04	0.28%	35.01	5.31%	66.46	-9.57%	838.56	0.62%
		2090s	122.23	-5.04%	24.60	11.93%	38.88	16.95%	58.75	-20.06%	839.84	0.78%
	SSP5-8.5	2030s	133.78	3.94%	22.83	3.85%	37.00	11.30%	73.96	0.64%	828.28	-0.61%
		2050s	127.60	-0.87%	23.11	5.17%	36.68	10.35%	67.80	-7.75%	834.47	0.13%
		2070s	134.65	4.62%	25.49	15.98%	38.84	16.85%	70.32	-4.32%	827.41	-0.71%
		2090s	135.28	5.10%	26.49	20.51%	42.81	28.77%	65.98	-10.22%	826.79	-0.79%
碧玉兰 *C. lowianum*	—	现代 Current	39.33	—	7.57	—	9.52	—	22.24	—	922.74	—
	SSP1-2.6	2030s	35.13	-10.68%	7.01	-7.39%	7.87	-17.30%	20.25	-8.96%	926.94	0.46%
		2050s	39.87	1.37%	8.60	13.70%	10.31	8.26%	20.96	-5.78%	922.20	-0.06%
		2070s	41.85	6.41%	6.33	-16.31%	9.69	1.75%	25.83	16.14%	920.22	-0.27%
		2090s	42.34	7.64%	7.24	-4.29%	9.82	3.15%	25.27	13.62%	919.73	-0.33%
	SSP5-8.5	2030s	42.57	8.25%	8.32	9.91%	10.32	8.42%	23.94	7.61%	919.49	-0.35%
		2050s	59.47	51.22%	11.42	50.99%	18.24	91.61%	29.81	34.01%	902.59	-2.18%
		2070s	47.49	20.76%	8.49	12.23%	10.77	13.17%	28.23	26.90%	914.57	-0.88%
		2090s	50.36	28.05%	10.76	42.24%	9.81	2.99%	29.80	33.95%	911.70	-1.20%
大根兰 *C. macrorhizon*	—	现代 Current	241.50	—	64.18	—	82.49	—	94.83	—	720.57	—
	SSP1-2.6	2030s	254.01	5.18%	68.24	6.32%	85.83	4.06%	99.94	5.38%	708.06	-1.74%
		2050s	258.49	7.04%	71.24	11.00%	81.51	-1.18%	105.75	11.51%	703.57	-2.36%
		2070s	261.64	8.34%	65.84	2.59%	89.16	8.09%	106.64	12.45%	700.43	-2.80%
		2090s	266.35	10.29%	68.99	7.50%	90.25	9.41%	107.11	12.95%	695.71	-3.45%
	SSP5-8.5	2030s	254.96	5.57%	69.62	8.48%	83.02	0.65%	102.31	7.89%	707.11	-1.87%
		2050s	260.45	7.85%	73.28	14.17%	83.75	1.54%	103.42	9.06%	701.61	-2.63%
		2070s	260.72	7.96%	70.93	10.51%	79.14	-4.06%	110.65	16.69%	701.35	-2.67%
		2090s	289.87	20.03%	78.18	21.81%	94.58	14.66%	117.11	23.50%	672.20	-6.71%
	—	现代 Current	74.70	—	4.63	—	23.03	—	47.04	—	887.36	—
	SSP1-2.6	2030s	76.56	2.49%	6.26	34.99%	27.11	17.71%	43.20	-8.16%	885.50	-0.21%

		2050s	79.67	6.65%	5.57	20.23%	33.81	46.80%	40.29	-14.35%	882.39	-0.56%
独占春		2070s	75.54	1.11%	6.40	38.03%	26.73	16.08%	42.41	-9.85%	886.53	-0.09%
C. eburneum		2090s	75.27	0.76%	6.19	33.57%	28.22	22.52%	40.87	-13.12%	886.79	-0.06%
		2030s	76.88	2.91%	5.52	19.22%	25.87	12.32%	45.49	-3.30%	885.19	-0.25%
	SSP5-8.5	2050s	77.83	4.18%	4.19	-9.63%	28.50	23.74%	45.14	-4.03%	884.24	-0.35%
		2070s	74.81	0.14%	4.30	-7.19%	25.16	9.26%	45.35	-3.60%	887.26	-0.01%
		2090s	73.98	-0.97%	5.13	10.75%	21.98	-4.55%	46.86	-0.37%	888.09	0.08%
	—	现代 Current	300.45	—	45.71	—	79.77	—	174.98	—	661.62	—
		2030s	352.35	17.28%	48.68	6.51%	95.78	20.08%	207.89	18.81%	609.71	-7.85%
	SSP1-2.6	2050s	329.27	9.59%	47.93	4.87%	85.49	7.17%	195.85	11.93%	632.80	-4.36%
豆瓣兰		2070s	326.83	8.78%	49.45	8.20%	84.49	5.92%	192.88	10.23%	635.24	-3.99%
C. serratum		2090s	334.25	11.25%	53.57	17.21%	82.09	2.91%	198.59	13.50%	627.82	-5.11%
		2030s	271.07	-9.78%	49.32	7.92%	78.30	-1.83%	143.44	-18.02%	691.00	4.44%
	SSP5-8.5	2050s	299.48	-0.32%	45.43	-0.62%	83.22	4.32%	170.84	-2.36%	662.58	0.15%
		2070s	320.31	6.61%	52.67	15.24%	70.84	-11.19%	196.81	12.48%	641.75	-3.00%
		2090s	323.00	7.51%	44.91	-1.75%	77.16	-3.27%	200.94	14.84%	639.06	-3.41%
	—	现代 Current	96.53	—	14.94	—	35.90	—	45.70	—	865.53	—
		2030s	123.71	28.15%	22.33	49.50%	41.50	15.60%	59.88	31.03%	838.36	-3.14%
	SSP1-2.6	2050s	120.37	24.69%	17.32	15.96%	39.06	8.80%	63.99	40.04%	841.70	-2.75%
墨兰		2070s	121.40	25.76%	16.70	11.80%	43.02	19.83%	61.68	34.98%	840.66	-2.87%
C. sinense		2090s	114.96	19.09%	21.56	44.30%	34.73	-3.25%	58.67	28.40%	847.11	-2.13%
		2030s	126.68	31.22%	19.83	32.76%	41.65	16.01%	65.20	42.67%	835.39	-3.48%
	SSP5-8.5	2050s	119.57	23.86%	16.43	9.97%	37.99	5.83%	65.15	42.57%	842.50	-2.66%
		2070s	117.14	21.35%	16.49	10.40%	35.74	-0.44%	64.91	42.04%	844.93	-2.38%
		2090s	118.64	22.90%	25.16	68.42%	36.71	2.25%	56.77	24.24%	843.43	-2.55%
	—	现代 Current	60.15	—	9.91	—	21.32	—	28.92	—	901.91	—
	SSP1-2.6	2030s	59.77	-0.63%	10.70	7.88%	22.58	5.94%	26.49	-8.39%	902.30	0.04%
		2050s	61.01	1.42%	12.49	25.98%	20.92	-1.87%	27.60	-4.59%	901.06	-0.09%

纹瓣兰		2070s	59.09	-1.76%	10.87	9.63%	18.91	-11.30%	29.32	1.36%	902.98	0.12%
C. aloifolium		2090s	72.49	20.51%	12.86	29.73%	24.02	12.66%	35.61	23.12%	889.58	-1.37%
	SSP5-8.5	2030s	60.43	0.46%	10.13	2.21%	19.36	-9.20%	30.94	6.99%	901.64	-0.03%
		2050s	60.76	1.00%	11.96	20.66%	21.45	0.63%	27.34	-5.46%	901.31	-0.07%
		2070s	59.18	-1.62%	9.87	-0.44%	21.90	2.72%	27.41	-5.23%	902.89	0.11%
		2090s	63.20	5.07%	11.63	17.25%	22.36	4.89%	29.22	1.03%	898.86	-0.34%
莎叶兰 *C. cyperifolium*	—	现代 Current	114.37	—	13.81	—	32.76	—	67.80	—	847.69	—
	SSP1-2.6	2030s	109.60	-4.18%	14.14	2.39%	28.53	-12.90%	66.92	-1.30%	852.47	0.56%
		2050s	107.50	-6.01%	12.24	-11.38%	32.34	-1.28%	62.92	-7.20%	854.57	0.81%
		2070s	99.68	-12.85%	12.69	-8.11%	28.06	-14.34%	58.92	-13.09%	862.39	1.73%
		2090s	116.82	2.14%	13.92	0.79%	35.01	6.86%	67.89	0.14%	845.25	-0.29%
	SSP5-8.5	2030s	123.25	7.76%	16.15	16.95%	33.02	0.79%	74.08	9.26%	838.82	-1.05%
		2050s	116.12	1.53%	14.15	2.46%	31.10	-5.07%	70.87	4.53%	845.94	-0.21%
		2070s	114.38	0.01%	14.58	5.56%	32.84	0.24%	66.97	-1.23%	847.68	0.00%
		2090s	103.87	-9.18%	13.49	-2.33%	29.16	-10.98%	61.22	-9.70%	858.19	1.24%
建兰 *C. ensifolium*	—	现代 Current	200.95	—	42.00	—	66.02	—	92.94	—	761.11	—
	SSP1-2.6	2030s	206.90	2.96%	49.19	17.13%	67.51	2.26%	90.19	-2.95%	755.17	-0.78%
		2050s	199.80	-0.58%	42.97	2.31%	65.25	-1.17%	91.58	-1.46%	762.27	0.15%
		2070s	212.37	5.68%	40.39	-3.82%	69.94	5.95%	102.03	9.79%	749.69	-1.50%
		2090s	199.11	-0.92%	39.27	-6.49%	66.16	0.22%	93.68	0.79%	762.95	0.24%
	SSP5-8.5	2030s	201.73	0.39%	42.71	1.69%	68.13	3.20%	90.89	-2.20%	760.33	-0.10%
		2050s	191.32	-4.79%	38.63	-8.01%	63.01	-4.56%	89.68	-3.51%	770.75	1.27%
		2070s	207.21	3.11%	43.40	3.35%	67.15	1.71%	96.66	4.00%	754.86	-0.82%
		2090s	198.84	-1.05%	45.22	7.67%	62.79	-4.89%	90.83	-2.27%	763.23	0.28%
寒兰	—	现代 Current	152.90	—	29.14	—	53.16	—	70.60	—	809.17	—
	SSP1-2.6	2030s	162.59	6.34%	35.41	21.54%	57.29	7.78%	69.88	-1.02%	799.48	-1.20%
		2050s	161.16	5.40%	31.12	6.79%	56.39	6.08%	73.65	4.31%	800.91	-1.02%
		2070s	160.09	4.70%	29.46	1.10%	52.78	-0.72%	77.85	10.26%	801.98	-0.89%

C. kanran		2090s	144.72	-5.35%	24.37	-16.37%	49.73	-6.45%	70.62	0.02%	817.35	1.01%
	SSP5-8.5	2030s	150.69	-1.45%	27.52	-5.57%	52.87	-0.55%	70.30	-0.42%	811.38	0.27%
		2050s	147.37	-3.62%	26.47	-9.15%	54.95	3.37%	65.95	-6.60%	814.70	0.68%
		2070s	160.76	5.14%	27.65	-5.09%	50.81	-4.41%	82.30	16.56%	801.30	-0.97%
		2090s	161.23	5.44%	28.84	-1.04%	56.23	5.78%	76.16	7.87%	800.84	-1.03%
蕙兰 *C. faberi*	-	现代 Current	265.97	-	72.44	-	99.90	-	93.63	-	696.10	-
	SSP1-2.6	2030s	265.83	-0.05%	77.36	6.80%	88.30	-11.61%	100.16	6.98%	696.24	0.02%
		2050s	262.51	-1.30%	74.69	3.11%	101.59	1.69%	86.23	-7.90%	699.56	0.50%
		2070s	259.01	-2.61%	77.91	7.56%	88.89	-11.02%	92.21	-1.51%	703.06	1.00%
		2090s	263.42	-0.96%	77.68	7.23%	91.88	-8.03%	93.86	0.25%	698.65	0.37%
	SSP5-8.5	2030s	261.59	-1.65%	72.10	-0.47%	90.49	-9.42%	99.00	5.73%	700.48	0.63%
		2050s	272.61	2.50%	76.78	5.99%	95.61	-4.29%	100.21	7.03%	689.46	-0.95%
		2070s	268.81	1.07%	77.66	7.21%	97.80	-2.10%	93.35	-0.30%	693.26	-0.41%
		2090s	261.94	-1.51%	68.32	-5.68%	100.14	0.24%	93.48	-0.16%	700.13	0.58%
春兰 *C. goeringii*	-	现代 Current	233.76	-	61.75	-	94.72	-	77.28	-	728.31	-
	SSP1-2.6	2030s	229.31	-1.90%	61.23	-0.84%	95.09	0.39%	72.98	-5.56%	732.76	0.61%
		2050s	230.87	-1.24%	65.61	6.25%	101.84	7.51%	63.41	-17.95%	731.20	0.40%
		2070s	228.92	-2.07%	64.29	4.11%	95.89	1.23%	68.74	-11.06%	733.15	0.66%
		2090s	233.14	-0.27%	55.33	-10.40%	96.65	2.03%	81.16	5.02%	728.93	0.09%
	SSP5-8.5	2030s	227.37	-2.73%	60.72	-1.68%	91.99	-2.88%	74.66	-3.39%	734.70	0.88%
		2050s	231.27	-1.06%	60.91	-1.37%	93.01	-1.81%	77.36	0.10%	730.80	0.34%
		2070s	229.20	-1.95%	65.42	5.94%	87.16	-7.98%	76.62	-0.85%	732.86	0.63%
		2090s	213.23	-8.78%	54.79	-11.27%	77.65	-18.03%	80.79	4.54%	748.84	2.82%
多花兰 *C. floribludum*	-	现代 Current	161.12	-	47.18	-	51.94	-	62.00	-	800.95	-
	SSP1-2.6	2030s	150.31	-6.71%	41.32	-12.43%	53.06	2.15%	55.93	-9.79%	811.76	1.35%
		2050s	164.64	2.18%	47.39	0.44%	54.12	4.18%	63.14	1.84%	797.43	-0.44%
		2070s	157.48	-2.26%	40.50	-14.16%	53.77	3.51%	63.21	1.96%	804.59	0.45%
		2090s	157.60	-2.19%	41.48	-12.09%	53.77	3.51%	62.36	0.58%	804.47	0.44%

		2030s	154.49	-4.12%	43.95	-6.84%	49.86	-4.02%	60.68	-2.12%	807.58	0.83%
	SSP5-8.5	2050s	150.34	-6.69%	41.57	-11.89%	48.81	-6.04%	59.96	-3.29%	811.73	1.35%
		2070s	151.74	-5.83%	43.85	-7.06%	51.79	-0.30%	56.10	-9.51%	810.33	1.17%
		2090s	162.56	0.89%	38.45	-18.50%	57.88	11.43%	66.23	6.82%	799.51	-0.18%
	-	现代 Current	98.93	-	23.03	-	22.57	-	53.33	-	863.14	-
		2030s	103.27	4.39%	21.75	-5.54%	24.70	9.46%	56.81	6.52%	858.80	-0.50%
		2050s	89.03	-10.00%	20.56	-10.73%	23.24	2.98%	45.23	-15.19%	873.04	1.15%
虎头兰 *C. hookerianum*	SSP1-2.6	2070s	133.73	35.18%	25.14	9.15%	28.47	26.16%	80.12	50.24%	828.34	-4.03%
		2090s	91.42	-7.59%	20.21	-12.24%	23.46	3.95%	47.74	-10.47%	870.65	0.87%
		2030s	94.36	-4.61%	22.53	-2.16%	24.34	7.83%	47.49	-10.94%	867.70	0.53%
	SSP5-8.5	2050s	125.61	26.97%	24.62	6.89%	27.10	20.06%	73.89	38.56%	836.46	-3.09%
		2070s	78.86	-20.28%	21.46	-6.82%	22.65	0.34%	34.76	-34.82%	883.20	2.32%
		2090s	95.02	-3.95%	21.60	-6.20%	22.79	0.98%	50.62	-5.07%	867.05	0.45%
	-	现代 Current	61.97	-	18.61	-	23.32	-	20.03	-	900.10	-
		2030s	60.11	-2.99%	12.99	-30.24%	27.08	16.12%	20.05	0.10%	901.95	0.21%
	SSP1-2.6	2050s	60.57	-2.25%	18.88	1.42%	20.91	-10.33%	20.78	3.76%	901.49	0.15%
黄蝉兰 *C. iridioides*		2070s	65.33	5.43%	23.32	25.27%	19.61	-15.89%	22.40	11.83%	896.74	-0.37%
		2090s	61.39	-0.93%	14.37	-22.82%	26.32	12.84%	20.71	3.38%	900.68	0.06%
		2030s	61.38	-0.94%	17.36	-6.72%	24.31	4.24%	19.71	-1.60%	900.68	0.06%
	SSP5-8.5	2050s	62.43	0.76%	20.51	10.20%	22.52	-3.43%	19.40	-3.15%	899.63	-0.05%
		2070s	58.55	-5.51%	15.41	-17.23%	24.28	4.12%	18.86	-5.84%	903.52	0.38%
		2090s	61.43	-0.87%	20.79	11.68%	19.77	-15.23%	20.87	4.19%	900.64	0.06%
	-	现代 Current	58.34	-	9.39	-	17.58	-	31.37	-	903.73	-
		2030s	57.13	-2.07%	10.23	8.95%	18.80	6.97%	28.10	-10.44%	904.94	0.13%
	SSP1-2.6	2050s	56.16	-3.73%	9.36	-0.30%	18.25	3.85%	28.55	-9.00%	905.90	0.24%
硬叶兰 *C. mannii*		2070s	48.88	-16.22%	8.11	-13.61%	15.20	-13.50%	25.56	-18.52%	913.19	1.05%
		2090s	57.12	-2.09%	9.04	-3.66%	16.85	-4.15%	31.23	-0.46%	904.95	0.13%
	SSP5-8.5	2030s	57.14	-2.04%	9.24	-1.59%	16.74	-4.76%	31.17	-0.66%	904.92	0.13%

		2050s	53.21	-8.79%	8.41	-10.39%	16.43	-6.52%	28.36	-9.59%	908.86	0.57%
		2070s	55.27	-5.26%	9.79	4.29%	17.22	-2.03%	28.26	-9.92%	906.80	0.34%
		2090s	55.97	-4.06%	9.66	2.87%	17.45	-0.69%	28.86	-8.02%	906.10	0.26%
西藏虎头兰 *C. tracyanum*	-	现代 Current	67.22	-	14.63	-	18.05	-	34.54	-	894.85	-
	SSP1-2.6	2030s	74.28	10.50%	16.54	13.06%	19.64	8.82%	38.10	10.30%	887.79	-0.79%
		2050s	60.79	-9.57%	11.71	-19.94%	17.26	-4.38%	31.81	-7.90%	901.28	0.72%
		2070s	63.06	-6.19%	13.53	-7.48%	18.66	3.39%	30.86	-10.65%	899.01	0.46%
		2090s	70.10	4.28%	13.84	-5.40%	19.91	10.27%	36.35	5.24%	891.97	-0.32%
	SSP5-8.5	2030s	66.86	-0.54%	12.82	-12.37%	17.52	-2.94%	36.52	5.72%	895.21	0.04%
		2050s	82.50	22.73%	16.50	12.80%	21.60	19.66%	44.40	28.53%	879.57	-1.71%
		2070s	61.14	-9.05%	10.72	-26.68%	19.81	9.75%	30.60	-11.40%	900.93	0.68%
		2090s	61.77	-8.11%	12.08	-17.42%	17.61	-2.47%	32.09	-7.11%	900.30	0.61%
莎草兰 *C. elegans*	-	现代 Current	144.04	-	29.74	-	25.99	-	88.30	-	818.03	-
	SSP1-2.6	2030s	130.59	-9.34%	29.64	-0.35%	24.06	-7.45%	76.90	-12.92%	831.48	1.64%
		2050s	106.00	-26.41%	23.63	-20.56%	24.75	-4.78%	57.62	-34.74%	856.07	4.65%
		2070s	107.43	-25.42%	23.90	-19.63%	23.13	-11.03%	60.39	-31.61%	854.64	4.48%
		2090s	113.87	-20.94%	30.29	1.84%	20.90	-19.60%	62.68	-29.01%	848.19	3.69%
	SSP5-8.5	2030s	107.36	-25.47%	27.64	-7.06%	20.95	-19.42%	58.77	-33.45%	854.71	4.48%
		2050s	128.65	-10.69%	28.84	-3.02%	23.76	-8.61%	76.05	-13.88%	833.42	1.88%
		2070s	101.90	-29.25%	25.59	-13.96%	22.82	-12.20%	53.49	-39.42%	860.16	5.15%
		2090s	99.08	-31.21%	24.64	-17.17%	23.23	-10.63%	51.21	-42.00%	862.99	5.50%
长叶兰 *C. erythraeum*	-	现代 Current	176.46	-	39.71	-	30.28	-	106.47	-	785.61	-
	SSP1-2.6	2030s	95.55	-45.85%	31.69	-20.19%	20.08	-33.67%	43.77	-58.88%	866.52	10.30%
		2050s	164.01	-7.05%	38.50	-3.05%	23.22	-23.30%	102.29	-3.93%	798.06	1.58%
		2070s	158.84	-9.98%	38.23	-3.72%	22.97	-24.15%	97.64	-8.29%	803.23	2.24%
		2090s	95.09	-46.11%	32.42	-18.37%	17.07	-43.61%	45.60	-57.17%	866.98	10.36%
	SSP5-8.5	2030s	126.85	-28.11%	37.37	-5.91%	21.02	-30.57%	68.46	-35.70%	835.22	6.31%
		2050s	159.18	-9.79%	38.25	-3.68%	24.92	-17.68%	96.01	-9.83%	802.89	2.20%

	2070s	149.55	-15.25%	38.25	-3.68%	23.13	-23.61%	88.17	-17.19%	812.52	3.43%
	2090s	150.26	-14.84%	37.65	-5.19%	22.38	-26.07%	90.23	-15.25%	811.80	3.33%